

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Materiałowo-technologiczna koncepcja konstrukcji prototypu silnika turbo-wałowego o spalaniu izochorycznym – analiza termiczna

Piotr Tarnawski¹

¹Institut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska
email: piotr.tarnawski@pw.edu.pl

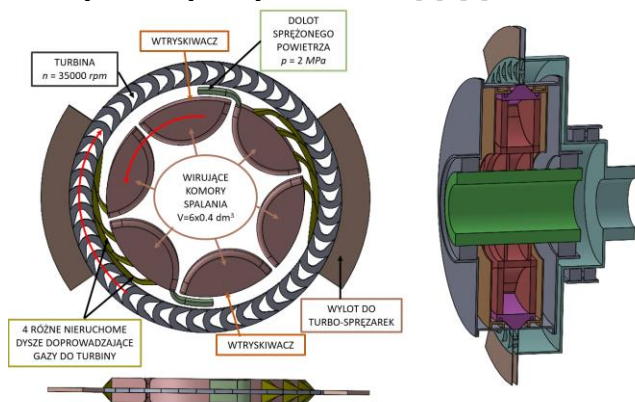
STRESZCZENIE: Artykuł przedstawia rozwiązanie konstrukcyjne prototypu silnika turbo-wałowego o spalaniu izochorycznym wraz z analizą możliwości technologicznych wykonawstwa oraz doбором materiałów konstrukcyjnych. Przedstawiona koncepcja konstrukcji opiera się o trójwymiarową analizę numeryczną transferu ciepła i rozkładu temperatury. W symulacji uwzględniono trzy sposoby transferu ciepła przewodzenie, konwekcję i promieniowanie. W pierwszym etapie przedstawiono konstrukcję prototypu samego układu rozrządu silnika, zawierającego wirujące komory spalania, układ wlotu i wylotu gazów oraz układ wtryskowy paliwa. Podstawowym celem skonstruowanego stanowiska badawczego powinna być weryfikacja eksperymentalna samonastawnego segmentowego systemu uszczelnień ceramicznych, które stanowią integralną część prezentowanej koncepcji silnika. W celu ograniczenia strat ciepła konstrukcji dążono do ograniczenia powierzchni kontaktu komór z wałem oraz ceramicznej tulei z korpusem. Ponadto wprowadzono ekrany ograniczające transfer ciepła drogą promieniowania. Finalnie wprowadzono żebra na wale oraz żebra na korpusie, co pozwoliło obniżyć temperaturę powierzchni zewnętrznej oraz końca wału poniżej 250°C. Drugi etap dotyczył konstrukcji prototypu silnika zawierający, oprócz komór spalania, dysze doprowadzające wysokotemperaturowe spaliny do turbiny. W celu ograniczenia wymaganej mocy chłodzenia zaproponowano wykonanie dysz z tlenku glinu (Al₂O₃), który charakteryzuje się maksymalną temperaturą pracy 1650°C.

SŁOWA KLUCZOWE: silnik turbo-wałowy, spalanie izochoryczne, chłodzenie, sprawność silnika

1. Wprowadzenie

Przeprowadzona analiza termiczna [1] jest kontynuacją prac nad rozwojem innowacyjnego silnika turbowałowego, wykorzystującego wzrost ciśnienia podczas spalania i pracującego zgodnie z obiegiem termodynamicznym Humphreya [2], [3] (Rys. 1). Wirujące komory spalania wraz z układem dysz stanowią układ rozrządu. Zapewniają one chwilowe zamykanie i otwieranie komór spalania.

Badania symulacyjne CFD opracowanej koncepcji silnika (Rys. 1) wykazują wyższą o 15% sprawność efektywną od obecnych na rynku klasycznych silników turbo-wałowych, pracujących zgodnie z obiegiem termodynamicznym Brytona-Joule'a, [4], [5].



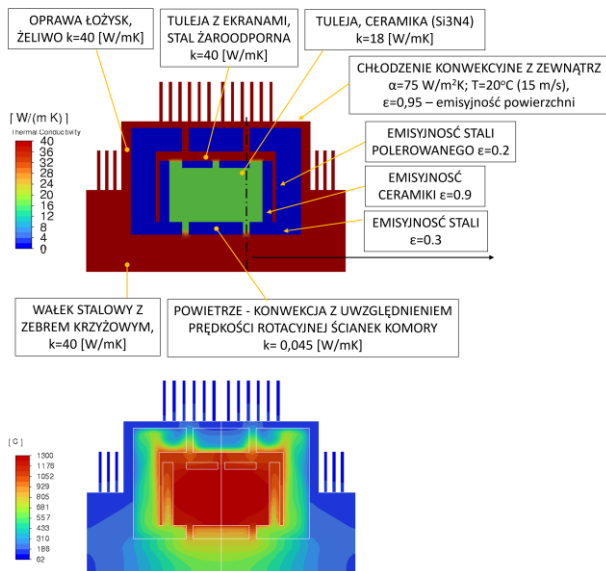
Rys. 1. Model symulacyjny silnika turbo-wałowego (lewy) oraz jego konstrukcja (prawy) – 500 kW

2. Konstrukcja układu rozrządu silnika

Pierwszy etap dotyczy konstrukcji prototypu samego układu rozrządu silnika zawierającego wirujące komory spalania, układ wlotu i wylotu gazu oraz układ wtryskowy paliwa. Podstawowym celem skonstruowanego stanowiska badawczego powinna być weryfikacja eksperymentalna samonastawnego segmentowego systemu uszczelnień ceramicznych, które stanowią integralną część prezentowanej koncepcji silnika. Proponowany system uszczelnień, polega na wykorzystaniu siły odśrodkowej. Segmentowe elementy uszczelniające samoczynnie wysuwają się z rowków komór i są dociskane do przeciw powierzchni (nieruchomej tulei), powodując uszczelnienie komory. Kluczową zaletą jest samonastawność elementów uszczelniających oraz niski i stały moment oporowy wynikający ze stałej siły odśrodkowej. Proponowany system uszczelnień komory zapewnia pełną szczelność niezależnie od temperatury i związanych z nią deformacją komory i korpusu. Uszczelnienia mogą zmieniać wymiary w kierunku obwodowym i poprzecznym przy zapewnieniu szczelności komór. Taka regulacja jest niezbędna, aby dopasować się do rozszerzalności cieplnej elementów pracujących w wysokiej temperaturze.

Komory spalania, segmentowe uszczelnienia oraz ceramiczna tuleja powinny być wykonane z azotku krzemu (Si₃N₄), który jest odporny na wysoką temperaturę (1300°C) i ma małą rozszerzalność cieplną (3,2·10⁻⁶/oC). Mała rozszerzalność cieplna jest kluczowa aby uniknąć zbyt dużych odkształceń w systemie uszczelnień, a tym

samym ograniczyć ewentualne szczeliny i wyciek wysokociśnieniowych gazów. Na tuleje ceramiczną zaciśnięta jest tuleja z ekranami wykonana ze stali żaroodpornej o maksymalnej temperaturze pracy 1100°C. Na tuleję stalową zaciśnięty jest korpus żeliwny lub aluminiowy (Rys. 3). Przy założeniu 1300°C temperatury ścianek straty ciepła z komór powinny wynosić 978 W, co stanowi 0,78% energii chemicznej paliwa (wynik otrzymany z symulacji CFD pracy silnika wraz symulacją spalania). W celu ograniczenia strat ciepła konstrukcji dążono do ograniczenia powierzchni kontaktu komór z wałem oraz ceramicznej tulei z korpusem. Ponadto wprowadzono ekrany ograniczające transfer ciepła drogą promieniowania. Finalnie wprowadzono żebra na wale oraz żebra na korpusie (Rys. 2), co pozwoliło obniżyć temperaturę powierzchni zewnętrznej oraz końca wału poniżej 250°C umożliwiając ułożyskowanie. Straty ciepła z komór wyniosły 4160 W dla najlepszego wariantu (korpus ze stopu aluminium bez zeber), co stanowi 3,32% energii chemicznej paliwa.



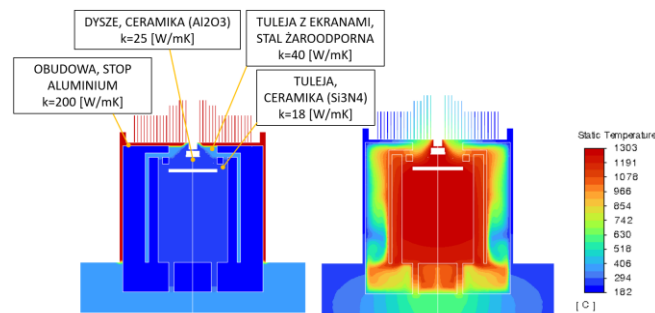
Rys. 2. Konstrukcja prototypu układu rozrządu silnika (górny) o jego rozkład temperatury (dolny)

3. Konstrukcja prototypu silnika

Drugi etap dotyczy konstrukcji prototypu silnika zawierający, oprócz komór spalania, dysze doprowadzające wysokotemperaturowe spaliny do turbiny oraz turbinę (Rys. 3). W tym rozwiązaniu ceramiczna tuleja (nieruchoma przeciwpowierzchnia) ma wykonane w środku otwory stanowiące dysze. Przy założeniu 1300°C straty ciepła z komór powinny wynosić 10 787 W (co stanowi 0,8% energii chemicznej paliwa), a z dysz 44 878 W, (co stanowi 3,25% energii chemicznej paliwa - wynik otrzymany z symulacji CFD pracy silnika wraz symulacją spalania).

W celu odprowadzenia wymaganej ilości ciepła z dysz powiększono powierzchnię styku ceramiki i korpusu w miejscach występowania dysz oraz wprowadzono strefowe ożebrowanie. Ciepło chłodzenia komór wyniosło 18 156 W (1,31% energii chemicznej paliwa), a ciepło chłodzenie dysz wyniosło 30 404 W (2,20% energii chemicznej paliwa), co jest bardzo bliskim wynikiem spełniającym wymaganie chłodzenia (Rys. 4). Należy jednak zwrócić uwagę, że żebra

występujące po prawej stronie komór znajdują się wewnątrz wałka turbiny, a więc będzie tam ograniczony dostęp nawiewu powietrza chłodzącego. Proponowanym rozwiązaniem jest wykonanie tulei ceramicznej (zawierające dysze) z dwóch różnych rodzajów ceramiki. Część wewnętrzna o grubości 4-5 mm powinna zostać wykonana z azotku krzemu (Si₃N₄) o małej rozszerzalności cieplnej ($3,2 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) i maksymalnej temperaturze pracy 1300°C. Druga część tulei o grubości 20 mm powinna być wykonana z tlenku glinu (Al₂O₃) o rozszerzalności cieplnej ($8 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) i maksymalnej temperaturze pracy 1650°C [6]. Takie rozwiązanie pozwoliło by ograniczyć potrzebę chłodzenia dysz i jednocześnie zachować podobnego rzędu odkształcenia termiczne komór, uszczelnień i ceramicznej przeciwpowierzchni zachowując ten sam materiał z jakiego zostaną wykonane.



Rys. 3. Konstrukcja prototypu silnika (lewy) i jego rozkład temperatury (prawy)

4. Podsumowanie

Wykonano trójwymiarową analizę termiczną konstrukcji prototypu silnika wraz z doбором materiałów konstrukcyjnych spełniających wymagania temperaturowe. W celu uzyskania wysokiej sprawności silnika do budowy komory spalania oraz dysz użyto dwóch rodzajów ceramiki, zapewniające wysoką temperaturę gazu w obiegu termodynamicznym. W celu ograniczenia strat ciepła ograniczono kontakt komór i dysz z korpusem oraz wprowadzono ekrany. Finalna wartość ciepła chłodzenia jest porównywalna z wynikami otrzymanymi z symulacji CFD pracy silnika wraz symulacją spalania. Oznacza to, że obliczona sprawność silnika może być zachowana w zaproponowanej konstrukcji.

Literatura

- [1] Theory Guide. ANSYS® Academic Associate CFD, Release 16.2, Help System; ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA, 2016.
- [2] Tarnawski P. The hybrid concept of turboshaft engine working according to Humphrey cycle dedicated to variety power demand – CFD analysis. *Combustion Engines*. 2023;193(2):129-136. <https://doi.org/10.19206/CE-162763>
- [3] Brophy C, Roy G. Benefits and challenges of pressure-gain combustion systems for gas turbines. *Mech Eng*. 2009; 131(3):54-55. <https://doi.org/10.1115/1.2009-MAR-8>
- [4] Land Defense, "MTU Partner for Unrivaled Solutions," MTU-Defense-brochure.pdf, 2016. <https://svf-international.com/mexico/wp-content/uploads/sites/5/2016/05/MTUDefense-brochure.pdf>.
- [5] Mazuro, P. and Chmielewski, C., "Military Vehicle Options Arise from the Barrel Type Piston Engine," *Journal of Power Technologies* 101, no. 1 (2021): 22-23.
- [6] https://www.ceromit.pl/uploads/PDFy/Ceromit_Al2O3.pdf Nilsson M., *Constitutive model for ArmoX 500T and ArmoX 600T at low and medium strain rates*, Technical Report F01-R-1068-SE, Swedish Defence Research Agency, 2003.